



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 100 23 370 A 1

51 Int. Cl. 7:  
H 02 P 6/18  
H 02 K 5/24  
H 02 P 6/10

21 Aktenzeichen: 100 23 370.8  
22 Anmeldetag: 12. 5. 2000  
43 Offenlegungstag: 22. 11. 2001

DE 100 23 370 A 1

71 Anmelder:  
ebm Werke GmbH & Co., 74673 Muldingen, DE  
74 Vertreter:  
Patentanwälte Dr. Solf & Zapf, 81543 München

72 Erfinder:  
Krotsch, Jens, Dipl.-Ing.(FH), 97996 Niederstetten,  
DE; Kilian, Thomas, Dipl.-Ing. (FH), 74214 Schöntal,  
DE

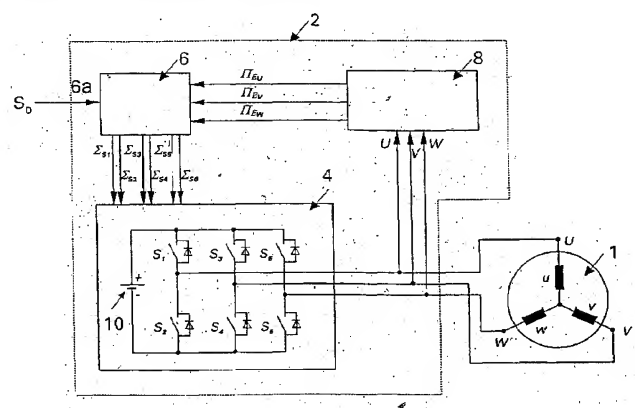
56 Entgegenhaltungen:  
DE 39 34 139 C2  
DE 33 06 642 C2  
DE 195 24 557 A1  
DE 36 02 227 A1  
US 58 35 992  
US 57 57 152  
US 54 91 393  
EP 08 81 761 A1  
EP 08 72 948 A1  
EP 06 21 681 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 System zur elektronischen Kommutierung eines bürstenlosen Gleichstrommotors

57 Die Erfindung betrifft ein System zur elektronischen Kommutierung eines bürstenlosen Gleichstrommotors (1) mit drei elektrisch um 120° versetzten Wicklungssträngen (u, v, w), mit einer die Wicklungsstränge (u, v, w) zur Erzeugung eines magnetischen Statorfeldes ansteuernden Halbleiterbrücke (4), bestehend aus sechs Leistungshalbleitern (S<sub>1</sub> bis S<sub>6</sub>), einer die Leistungshalbleiter (S<sub>1</sub> bis S<sub>6</sub>) entsprechend ansteuernden Steuereinheit (6) sowie einer Einrichtung zur Erfassung der jeweiligen Drehstellung eines ein permanentmagnetisches Polrad aufweisenden Rotors, wobei die Einrichtung zur Erfassung der Rotor-Drehstellung als sensorlose Auswerteeinheit (8) zur Auswertung der am gerade nicht angesteuerten Wicklungsanschluß (U; V; W) des Motors meßbaren, vom rotierenden Polrad induzierten Spannung ausgebildet ist. Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, unter Aufrechterhaltung der kostengünstigen und störungsunanfälligen, sensorlosen Rotorpositionserfassung eine Reduzierung von Lauf- und Kommutierungsgeräuschen zu erreichen. Dazu steuert die Steuereinheit (6) die Leistungshalbleiter (S<sub>1</sub> bis S<sub>6</sub>) in Abhängigkeit von den Rotor-Drehstellungen über eine elektrische Umdrehung des Gleichstrommotors hinweg mittels einer 12-Schritt-Kommutierung in zwölf unterschiedlichen Schaltzuständen an.



DE 100 23 370 A 1

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein System zur elektronischen Kommutierung eines bürstenlosen Gleichstrommotors mit drei elektrisch um 120° versetzten Wicklungssträngen, mit einer die Wicklungsstränge zur Erzeugung eines magnetischen Stator Drehfeldes ansteuernden Halbleiterbrücke aus sechs Leistungshalbleitern, einer die Leistungshalbleiter entsprechend ansteuernden Steuereinheit sowie einer Einrichtung zur Erfassung der jeweiligen Drehstellungen eines ein permanentmagnetisches Polrad aufweisenden Rotors, wobei die Einrichtung zur Erfassung der Rotor-Drehstellung als sensorlose Auswerteeinheit derart ausgebildet ist, daß eine Erfassung und Auswertung der jeweils am gerade nicht angesteuerten Wicklungsstranganschluß meßbaren, vom rotierenden Polrad induzierten Spannung erfolgt.

[0002] Zur elektronischen Kommutierung von kollektorlosen Gleichstrommotoren müssen der die Halbleiterbrücke ansteuernden Steuereinheit grundsätzlich Informationen über die aktuelle Drehlage des permanentmagnetischen Rotors relativ zum Stator zugeführt werden, damit zur Erzeugung eines Drehmomentes in der gewünschten Drehrichtung die jeweils geeigneten Wicklungsstränge angesteuert werden können, um so ein optimales Stator Drehfeld zu erzeugen. Im allgemeinen wird die Rotorlage durch Drehstellungssensoren, insbesondere Hall-Sensoren, anhand des permanentmagnetischen Rotorfeldes festgestellt. Vielfach müssen aber der Motor und seine zugehörige Kommutierungselektronik räumlich voneinander getrennt werden, so daß elektrische Verbindungsleitungen erforderlich sind, über die einerseits die Wicklungsstränge bestromt und andererseits die Signale der Rotor-Drehstellungssensoren zu der Steuerelektronik übertragen werden. Die Verbindungsleitungen und die notwendigen Verbindungen, z. B. Steckverbindungen, führen aber zu einem recht hohen Kostenaufwand insbesondere für Herstellung (Montage) und Material und steigern zudem auch die Störungsanfälligkeit.

[0003] Im Gegensatz dazu ist bei Systemen der gattungsgemäßen Art eine sensorlose Erfassung der Rotor-Drehstellungen vorgesehen, wodurch auf (Hall-)Sensoren und entsprechende separate Leitungsverbindungen verzichtet werden kann. Statt dessen werden dabei die Polaritäten bzw. Polaritätswechsel (Nulldurchgänge) der vom permanentmagnetischen Polradfeld in den Motorwicklungen induzierten Spannungen (Polradspannung bzw. EMK = elektromotorische Kraft) über den jeweils nicht angesteuerten stromlosen Wicklungsanschluß erfaßt und ausgewertet.

[0004] Ein solches sensorloses Kommutierungssystem ist beispielsweise aus der EP 0 881 761 A1 bekannt. Dabei werden zur sensorlosen Rotorpositionsbestimmung durch eine EMK-Detektorschaltung die Spannungen an den drei Motorwicklungsanschlüssen erfaßt und daraus drei korrespondierende binäre Ausgangssignale generiert. Über eine elektrische Umdrehung des Rotors werden auf diese Weise sechs verschiedene Kombinationen dieser Ausgangssignale erzeugt, welches eine Bestimmung der Rotorposition in 60°-Segmenten ermöglicht. Jeder Kombination bzw. jedem Rotorpositionsegment wird ein Schaltzustand der Brückenhälfte zugeordnet (wobei beim jeweiligen Schaltzustand ein Halbleiter zur Drehzahlstellung pulsweitenmoduliert getaktet wird). Über eine elektrische Umdrehung existieren demzufolge sechs verschiedene Schaltzustände in 60°-Abständen. Hierbei wird die Statorerregung (Statorfeld) in sechs Schritten innerhalb einer elektrischen Umdrehung weitergeschaltet, so daß es sich um eine 6-Schritt-Kommutierung handelt.

[0005] Ähnliche Kommutierungsschaltungen mit 6-

Schritt-Kommutierung sind auch in den Dokumenten EP 0 872 948 A1, DE 39 34 139 C2, DE 33 06 642 C2 und DE 36 02 227 A1 beschrieben.

[0006] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein System der eingangs beschriebenen, gattungsgemäßen Art zu schaffen, mit dem unter Aufrechterhaltung der kostengünstigen und störungsunanfälligen, sensorlosen Rotorpositionserfassung eine Reduzierung von Lauf- und Kommutierungsgeräuschen erreicht wird.

[0007] Erfindungsgemäß wird dies dadurch erreicht, daß die Steuereinheit die Leistungshalbleiter in Abhängigkeit von den Rotor-Drehstellungen über eine elektrische Umdrehung des Gleichstrommotors hinweg mittels einer 12-Schritt-Kommutierung in zwölf unterschiedlichen Schaltzuständen ansteuert. Dadurch wird die Statorerregung jeweils um kleinere Winkelschritte als bei einer 6-Schritt-Kommutierung weitergeschaltet, wodurch ein kontinuierlicher umlaufendes Statorfeld erzeugt wird.

[0008] Der Erfindung liegt zunächst die Erkenntnis zugrunde, daß es bei Anwendung einer 6-Schritt-Kommutierung während des Kommutierungszeitpunktes durch eine sprunghafte Änderung der Statorerregung zu Motorgeräuschen, dem sogenannten "Kommutierungsklicken", kommt. Bei Anwendungen des Elektromotors als Antrieb für einen Ventilator oder ein Gebläse sind diese Kommutierungsgeräusche vor allem im unteren Drehzahlbereich, in dem die Strömungsgeräusche in den Hintergrund treten, sehr ausgeprägt und störend und können deshalb in vielen Anwendungsfällen nicht akzeptiert werden. Erfindungsgemäß kann demgegenüber eine deutliche Reduzierung dieser Geräusche (insbesondere bei solchen Motoren mit außenliegendem Rotor) erreicht werden, indem pro elektrischer Umdrehung anstatt nur sechs Schaltzustände nunmehr doppelt so viele Schaltzustände der Leistungshalbleiter der Halbleiterbrücke vorgegeben werden, d. h. die Statorerregung in zwölf anstatt in sechs Schritten innerhalb eines elektrischen Drehwinkels von 360° weitergeschaltet wird.

[0009] Nun ist zwar eine solche 12-Schritt-Kommutierung an sich bekannt, allerdings ausschließlich mit gesonderten Sensoren zur Rotor-Positionserfassung. Dies liegt daran, daß die Fachwelt bisher stets davon ausging, daß eine sensorlose Ausführung einer 12-Schritt-Kommutierung nicht möglich ist, weil eine sensorlose Rotorpositionserfassung stets voraussetzt, daß jeweils ein Wicklungsanschluß stromlos, also von der Gleichspannungsquelle getrennt ist, um die induzierte Polradspannung (EMK) überhaupt mit einer sensorlosen Auswerteeinheit erfassen zu können. Dies ist aber bei einer 12-Schritt-Kommutierung im Unterschied zur 6-Schritt-Kommutierung nicht generell der Fall, weil es zu Bereichen mit Wicklungsstromüberlappungen kommt, in denen alle drei Wicklungsanschlüsse stromführend sind.

[0010] Insofern beruht die vorliegende Erfindung auf der weiteren Erkenntnis, daß eine 12-Schritt-Kommutierung nur dann möglich ist, wenn dafür gesorgt wird, daß Polaritätswechsel bzw. Nulldurchgänge der Polradspannung genau in solche – bei 12-Schritt-Kommutierung drastisch verkürzte – Intervalle fallen, in denen jeweils der entsprechende Wicklungsanschluß von der Gleichspannungsquelle getrennt ist und daher zur Erfassung der steuerungsrelevanten Größen benutzt werden kann.

[0011] Konkret wird dies bevorzugt dadurch erreicht, daß die EMK-Auswerteeinheit jeweils die Polradspannung zwischen einem Motorwicklungsanschluß und einem gemeinsamen Bezugspunkt erfaßt und ausgewertet. Dabei kann es sich bei dem Bezugspunkt entweder – wenn die Motorwicklungen in Sternschaltung geschaltet sind – um den tatsächlichen, über eine Leitung herausgezogenen Motor-Sternpunkt handeln oder aber um eine Sternpunkt-Nachbildung. Dazu

sei bemerkt, daß ja auch eine Motor-Dreieckschaltung fiktiv in eine Sternschaltung transferiert werden kann. Erfindungsgemäß erfaßt die EMK-Auswerteeinheit demnach praktisch die jeweilige Strangspannung bzw. "Strang-EMK" im Sternsystem anstatt der demgegenüber um 30° phasenverschobenen, verketteten, d. h. zwischen zwei Wicklungsanschlüssen meßbaren "Leiter-EMK". Durch diese erfindungsgemäße Maßnahme wird erreicht, daß Nulldurchgänge der Polradspannung überhaupt erfaßt werden können, weil diese genau in die Schritte fallen, in denen jeweils ein Wicklungsanschluß gerade über einen kurzen Bereich von 30° stromlos ist. Im Gegensatz dazu wäre eine Erfassung und Auswertung der jeweils zwischen zwei Motorwicklungsanschlüssen liegenden Spannung für eine 12-Schritt-Kommutierung nicht geeignet, weil dabei die Nulldurchgänge der induzierten Polradspannung stets dann auftreten würden, wenn alle drei Wicklungsanschlüsse stromführend, d. h. mit der Gleichspannungsquelle verbunden sind, so daß eine Erfassung gar nicht möglich wäre.

[0012] Weitere vorteilhafte Ausgestaltungsmerkmale der Erfindung sind in den Unteransprüchen enthalten.

[0013] Anhand der Zeichnung soll nun die Erfindung beispielhaft genauer erläutert werden. Dabei zeigen:

[0014] Fig. 1 ein Prinzipschaltbild eines erfindungsgemäßen Kommutierungssystems,

[0015] Fig. 2 ein Schaltbild einer bevorzugten Ausführung einer EMK-Auswerteeinheit,

[0016] Fig. 3 unterschiedliche Diagramme zur Erläuterung der Abläufe bei der Anwendung des erfindungsgemäßen Kommutierungssystems,

[0017] Fig. 4 ein Flußdiagramm des Steuerungsablaufs für das erfindungsgemäße Kommutierungssystem,

[0018] Fig. 5 ein entsprechendes Flußdiagramm speziell für den Startvorgang,

[0019] Fig. 6 Diagramme für Start und Normalbetrieb und

[0020] Fig. 7 eine vergrößerte Darstellung des Zeitbereichs VII in Fig. 6.

[0021] Wie sich zunächst aus Fig. 1 ergibt, wird ein dreiphasiger bzw. dreisträngiger Gleichstrommotor 1 von einem erfindungsgemäßen Kommutierungssystem 2 angesteuert. Von dem Motor 1 ist nur ein Stator mit drei elektrisch um jeweils 120° versetzten Wicklungssträngen u, v, w angedeutet; ein zugehöriger permanentmagnetischer Rotor (Polrad) ist nicht dargestellt. Im dargestellten Beispiel sind die Wicklungsstränge u, v, w in Sternschaltung geschaltet, allerdings ist erfindungsgemäß durchaus auch eine Dreieckschaltung möglich. Die Wicklungsstränge u, v, w sind über ihre Stranganschlüsse U, V, W mit einem als Halbleiterbrücke 4 ausgebildeten Leistungsteil verbunden. Die Halbleiterbrücke 4 besteht aus sechs Leistungshalbleitern  $S_1$  bis  $S_6$ , die ihrerseits von einer Steuereinheit 6 über Steuersignale  $\Sigma_{S1}$  bis  $\Sigma_{S6}$  angesteuert werden, und zwar in Abhängigkeit von den jeweiligen Drehstellungen des Rotors. Zur Erfassung der Rotordrehstellungen ist eine EMK-Auswerteeinheit 8 vorgesehen, die mit den Wicklungsstranganschlüssen U, V und W verbunden ist, um die in den Wicklungssträngen u, v, w jeweils durch den rotierenden Rotor induzierte EMK bzw. die sog. Polradspannung zu erfassen und bezüglich ihrer Polaritäten bzw. Nulldurchgänge auszuwerten. In Abhängigkeit davon erzeugt die EMK-Auswertung 8 entsprechende Ausgangssignale  $\Pi_{EU}$ ,  $\Pi_{EV}$  und  $\Pi_{EW}$  für die Steuereinheit 6. Zur Erzeugung eines magnetischen Stator-drehfeldes werden von der Steuereinheit 6 die Leistungshalbleiter  $S_1$  bis  $S_6$  in jeweils zyklisch wechselnden Kombinationen angesteuert, indem die Wicklungsanschlüsse U, V, W entweder mit dem positiven oder dem negativen Anschluß einer Gleichspannungsquelle 10 verbunden oder hochohmig von der Spannungsquelle 10 getrennt werden.

Ein Betrieb des Motors 1 hinsichtlich eines hohen Wirkungsgrades ist – unter Vernachlässigung der elektrischen Zeitkonstante der Motor-Wicklungsstränge – dann erreicht, wenn die zwischen den Wicklungsanschlüssen U, V, W erfaßbare EMK den gleichen Verlauf und die gleiche Phasenlage wie die von der Halbleiterbrücke 4 an diesen Anschlüssen vorgegebene Spannung hat. Zur entsprechenden Ansteuerung werden der Steuereinheit 6 die Ausgangssignale  $\Pi_{EU}$ ,  $\Pi_{EV}$  und  $\Pi_{EW}$  der EMK-Auswerteeinheit 8 zugeführt, welche der Polarität der in den Wicklungssträngen u, v, w des Motors 1 induzierten EMK entsprechen bzw. die derzeitige Position des Rotors widerspiegeln. Darüber hinaus weist die Steuereinheit 6 einen Steuereingang 6a auf, über den ein Drehzahlsteuersignal  $S_D$  zur Beeinflussung der Motordrehzahl zugeführt werden kann.

[0022] In denjenigen Phasen, in denen jeweils zwei der drei Wicklungsstränge an die speisende Gleichspannungsquelle 10 geschaltet sind, der dritte Wicklungsanschluß aber hochohmig von der Spannungsquelle 10 getrennt ist, kann letzterer zur Erfassung der in diesem Wicklungsstrang induzierten EMK (Polradspannung) genutzt werden. Die EMK-Auswertung 8 erfaßt die jeweilige Polarität der Strang-EMK und erzeugt daraus die drei binären Ausgangssignale  $\Pi_{EU}$ ,  $\Pi_{EV}$  und  $\Pi_{EW}$ , die jeweils einem Wicklungsstrang zugeordnet sind und die beispielsweise ein logisches 1-Signal liefern bei positiver Spannung an dem entsprechenden Wicklungsstrang und ein logisches 0-Signal bei negativer Strangspannung. Über eine elektrische Umdrehung des Motors 1 ergeben sich dadurch – grundsätzlich analog zu einer sensorbehafteten Methode mit im Motor angeordneten Hall-Sensorschaltungen – sechs verschiedene Ausgangskombinationen, denen eine bestimmte Rotorlage (in 60°-Segmenten) eindeutig zugeordnet werden kann.

[0023] In Fig. 3 sind bei 3a schematisch die vom rotierenden Polrad induzierten Spannungen (EMK's)  $E_U$ ,  $E_V$  und  $E_W$  in den einzelnen Wicklungssträngen veranschaulicht. Im Diagramm 3b sind die entsprechenden Spannungen  $E_{U-V}$ ,  $E_{V-W}$  und  $E_{W-U}$  veranschaulicht, die jeweils zwischen zwei Wicklungsanschlüssen erfaßbar wären. Zusätzlich zeigt Diagramm 3b den realen überlagerten Verlauf der an die Wicklungsanschlüsse angelegten Spannungen  $U_{U-V}$ ,  $U_{V-W}$  und  $U_{W-U}$  und der induzierten Spannungen. Im Diagramm 3c sind die Ausgangssignale  $\Pi_{EU}$ ,  $\Pi_{EV}$  und  $\Pi_{EW}$  der EMK-Auswertung 8 idealisiert und beispielhaft für den in Stern geschalteten Motor dargestellt.

[0024] Obwohl sich die Zustände der in Fig. 3c dargestellten Ausgangssignale jeweils alle 60°el ändern, ist erfindungsgemäß vorgesehen, daß die Steuereinheit 6 die Leistungshalbleiter  $S_1$  bis  $S_6$  der Halbleiterbrücke 4 in Abhängigkeit von den Ausgangssignalen gemäß Fig. 3c über eine elektrische Umdrehung hinweg mittels einer 12-Schritt-Kommutierung, d. h. in zwölf unterschiedlichen Schaltzuständen, ansteuert. In bevorzugter Ausgestaltung wird in jedem dieser Schaltzustände einer der Leistungshalbleiter zur Drehzahlstellung vorzugsweise pulsweitenmoduliert getaktet.

[0025] Da sich bei einer 12-Schritt-Kommutierung zwangsläufig Phasen ergeben, in denen zeitweise alle drei Wicklungsanschlüsse auf definiertem Potential liegen und dadurch kein offener Wicklungsanschluß zur Erfassung der EMK zur Verfügung steht, wird erfindungsgemäß dafür gesorgt, daß die steuerungstechnisch relevanten Nulldurchgänge der EMK's in diejenigen Intervalle fallen, in denen jeweils ein Wicklungsanschluß von der Gleichspannungsquelle getrennt ist.

[0026] Gemäß Fig. 2 wird dies durch eine spezielle Art der EMK-Auswerteeinheit 8 erreicht, die derart ausgelegt ist, daß sie jeweils die Polradspannung (EMK) zwischen ei-

nem Motorwicklungsanschluß U, V, W und einem gemeinsamen Bezugspunkt X erfaßt und auswertet. Im dargestellten Schaltungsbeispiel nach **Fig. 2** handelt es sich bei dem Bezugspunkt X um einen resistiv nachgebildeten Sternpunkt des Motors. Die an den Wicklungsanschlüssen U, V, W abgegriffenen Spannungen werden mit dem am Bezugspunkt X anstehenden Potential mittels Komparatoren U1A, U1B bzw. U1C verglichen, an deren Ausgängen die binären Ausgangssignale  $\Pi_{EU}$ ,  $\Pi_{EV}$  und  $\Pi_{EW}$  erzeugt werden.

**[0027]** Wie sich nun weiterhin aus **Fig. 3** ergibt, leitet die Steuereinheit **6** aus den Ausgangssignalen  $\Pi_{EU}$ ,  $\Pi_{EV}$  und  $\Pi_{EW}$  der EMK-Auswertung **8** die Ansteuersignale  $\Sigma_{S1}$  bis  $\Sigma_{S6}$  für die Halbleiterbrücke **4** ab. Dieser Zusammenhang ergibt sich aus den Diagrammen **3c**, **3d** und ergänzend **3e**, wobei **3d** die einzelnen Ansteuersignale für die Leistungshalbleiter veranschaulicht, und **3e** zeigt die Wicklungsstränge des Motors in den jeweils zugehörigen Ansteuerzuständen. Das Funktionsprinzip im Normalbetrieb soll nun ausgehend vom Zustand  $\Sigma_1$  erläutert werden.

**[0028]** Im Zustand  $\Sigma_1$  sind die Schalter  $S_3$  und  $S_6$  aktiv.  $S_3$  leitet ständig,  $S_6$  wird vorzugsweise zur Drehzahlstellung pulsweitenmoduliert getaktet, was der schraffiert gezeichnete Teil des  $\Sigma_{S6}$ -Signals andeuten soll. Da nur zwei Halbleiterschalter leiten, ist die Detektion der EMK im derzeit nicht stromdurchflossenen Wicklungsstrang u, d. h. am nicht mit der Gleichspannungsquelle **10** verbundenen Wicklungsanschluß U möglich. Durch Drehung des Rotors wechselt die EMK in diesem Wicklungsstrang zum Zeitpunkt  $t_2$  ihre Polarität, was in einem Pegelwechsel des  $\Pi_{EU}$ -Signals resultiert. Diese Flanke löst den Schaltzustand  $\Sigma_2$  aus, der gemäß der 12-Schritt-Kommutierung zwischen zwei Zuständen der konventionellen 6-Schritt-Kommutierung zur Reduzierung des Kommutierungsgeräusches und der Laufgeräusche des Motors gelegt wird. Bei diesem Zustand sind die Leistungshalbleiter  $S_2$ ,  $S_3$  und  $S_6$  leitend, d. h. alle Wicklungsanschlüsse sind mit der Gleichspannungsquelle **10** verbunden, weshalb eine Detektion der EMK nicht mehr möglich ist. Deshalb wird eine Kommutierungszeit  $t_{kom}$  aus der aktuellen Drehzahl des Motors und einem vorgegebenen Drehwinkel  $\phi_{kom}$  berechnet. Diese Zeit  $t_{kom}$  beginnt zum Zeitpunkt  $t_2$  und endet im Zeitpunkt  $t_3$  des Übergangs zum nächsten Schaltzustand  $\Sigma_3$ , bei dem  $S_6$  ausgeschaltet wird. Der Wicklungsanschluß W ist nun nicht mehr mit der Gleichspannungsquelle **10** verbunden, was eine Detektion der EMK im Strang w ermöglicht. Mit dem nächsten Pegelwechsel des  $\Pi_{EW}$ -Signals zum Zeitpunkt  $t_4$  wiederholt sich dieser Ablauf sinngemäß, wie sich dies aus **Fig. 3d** ergibt.

**[0029]** In **Fig. 4** ist dieser beschriebene Steuerungsablauf allgemeiner in Form eines Flußdiagramms dargestellt. Aufgrund der in **Fig. 4** enthaltenen Textbestandteile sind weitere Erläuterungen nicht notwendig.

**[0030]** Gemäß **Fig. 3** liegen erfindungsgemäß folgende Regelmäßigkeiten bei der bevorzugt vorgesehenen Pulsweitenmodulation zur Änderung der effektiven Wicklungsspannung, d. h. zur Beeinflussung der Drehzahl vor:

- Während jedem Kommutierungsschritt wird maximal ein Leistungshalbleiter pulsweitenmoduliert getaktet.
- Jeder Halbleiter wird für einen zusammenhängenden elektrischen Winkel von  $60^\circ$  pulsweitenmoduliert getaktet.
- Bei einem Wechsel von einem geradzahlgigen Zustand ( $\Sigma_2, \Sigma_4 \dots$ ), wobei jeweils drei Halbleiter aktiv sind, zu einem ungeradzahlgigen Zustand ( $\Sigma_1, \Sigma_3 \dots$ ) mit jeweils zwei aktiven Halbleitern wechselt der pulsweitenmoduliert getaktete Halbleiter nicht. Beim Wechsel von einem ungeradzahlgigen Zustand zu einem

geradzahlgigen Zustand wechselt der pulsweitenmoduliert getaktete Halbleiter.

d) Der Aussteuergrad der pulsweitenmoduliert getakteten Halbleiter bei geradzahlgigen und ungeradzahlgigen Zuständen ist vorzugsweise unterschiedlich, insbesondere bei geradzahlgigen Zuständen kleiner als bei ungeradzahlgigen.

**[0031]** Wie schon erläutert wurde, ist die sensorlose 12-Schritt-Kommutierung möglich, weil bei der erfindungsgemäßen Kommutierungsabfolge in Verbindung mit der speziellen EMK-Auswertung **8** z. B. gemäß **Fig. 2** der Polaritätswechsel der EMK in einem Strang stets zu einem Zeitpunkt geschieht, bei dem der korrespondierende Wicklungsanschluß offen ist und dadurch zur Erfassung und Auswertung der vom Polrad induzierten Spannung zur Verfügung steht.

**[0032]** Die elektrische Zeitkonstante der Motorwicklung ist in der Realität nicht Null. Dadurch kommt es zu einer frequenz- bzw. drehzahlabhängigen Phasenverschiebung zwischen dem Wicklungsstrom und der an den Wicklungen anstehenden Wechselfspannung, wodurch der Motorwirkungsgrad sinkt. Um dies auszugleichen, sollte die Kommutierung mit zunehmender Drehzahl zu einem früheren Zeitpunkt erfolgen.

**[0033]** Für die ungeradzahlgigen Zustände  $\Sigma_1, \Sigma_3, \Sigma_5, \Sigma_7, \Sigma_9$  und  $\Sigma_{11}$  geschieht dies erfindungsgemäß über den Winkel  $\phi_{kom}$ , der an die aktuelle Drehzahl des Motors angepaßt wird. Mit steigender Drehzahl wird  $\phi_{kom}$  kleiner, wodurch die Kommutierung früher durchgeführt wird. Bei den geradzahlgigen Zuständen  $\Sigma_2, \Sigma_4, \Sigma_6, \Sigma_8, \Sigma_{10}$  und  $\Sigma_{12}$  ist eine solche Vorzündung nicht möglich, da sonst der Polaritätswechsel der EMK nicht mehr detektiert werden könnte.

**[0034]** In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird der Winkel  $\phi_{kom}$  in Abhängigkeit von der Drehzahl hinsichtlich des gewünschten Motorverhaltens angepaßt. Im allgemeinen ist ein möglichst hoher Wirkungsgrad gefordert, wodurch der Winkel  $\phi_{kom}$  degressiv mit der Drehzahl verändert wird. Die geradzahlgigen Zustände  $\Sigma_2, \Sigma_4$  bis  $\Sigma_{12}$  werden dagegen zeitgleich mit dem Polaritätswechsel der EMK vorgegeben.

**[0035]** Bei einer weiteren vorteilhaften Variante werden ab einer festgelegten Drehzahl  $n_{Grenz}$  des Motors die geradzahlgigen Zustände durch die zuvor bestehenden ungeradzahlgigen Zustände ersetzt. Ist die Drehzahl kleiner als  $n_{Grenz}$ , wird die Abfolge  $\dots \Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3 \dots \Sigma_{11}, \Sigma_{12}, \Sigma_1 \dots$  von der Steuereinheit **6** vorgegeben, ist die Drehzahl dagegen größer, liegt die Abfolge  $\dots \Sigma_1, \Sigma_1, \Sigma_3, \Sigma_3, \dots \Sigma_{11}, \Sigma_{11}, \Sigma_1 \dots$  vor. Entsprechendes gilt selbstverständlich auch in umgekehrter Reihenfolge für die andere Drehrichtung des Motors.

**[0036]** Bisher wurde von einem sich drehenden Motor ausgegangen (Normalbetrieb). Im Stillstand des Motors wird aber (noch) keine EMK in den Wicklungen induziert, wodurch die Information über die Lage des Rotors fehlt. Für den sensorlosen Start wird deshalb bevorzugt ein spezielles Verfahren angewandt. Dabei kann vorteilhafterweise die 12-Schritt-Kommutierung auch auf den Startvorgang des Motors übertragen werden. Insbesondere werden hierbei die – gegenüber der 6-Schritt-Kommutierung – bei der 12-Schritt-Kommutierung zusätzlich eingefügten Zwischenschritte angewendet.

**[0037]** Gemäß dem Stand der Technik wird zum Start des Motors – nach dem Ausrichten des Rotors in eine definierte Lage durch Bestromung der Wicklungen mit Gleichstrom – eine Schrittsequenz ohne Berücksichtigung der Signale der EMK-Auswertung vorgegeben (sog. offener Wirkungskreis), bis eine ausreichend hohe Drehzahl erreicht ist, d. h.

die Amplitude der EMK genügend groß ist, um ihre Polarität zu erfassen. Diese Schrittsequenz wird für eine bestimmte mechanische Zeitkonstante des Antriebssystems festgelegt. Schwierigkeiten ergeben sich bei sich ändernden Lastverhältnissen oder unterschiedlichen Trägheitsmomenten. Hier kann es vorkommen, daß der Rotor der Schrittsequenz nicht folgen kann und daher nicht anläuft.

[0038] Aus Kostengründen wird häufig zur Ansteuerung der gemäß Fig. 1 "oberen" (ungeradzahlig) Leistungshalbleiter  $S_1, S_3, S_5$  für die Spannungsversorgung der zugehörigen Treiberstufen eine sog. Boot-Strap-Schaltung angewandt. Dieses Schaltungsprinzip hat aber den Nachteil, daß die "oberen" Halbleiterschalter nicht beliebig lange eingeschaltet werden können, oder ein Brückenweig nicht beliebig lange inaktiv sein kann, da sonst die Spannung über der Boot-Strap-Kapazität auf einen unzureichenden Wert abfallen kann. Bei langsam anlaufenden Motoren kann es zu Schwierigkeiten bei der Ansteuerung kommen.

[0039] Ein erfindungsgemäß bevorzugtes Startverfahren soll die genannten Nachteile beseitigen.

[0040] Diesem bevorzugten Startverfahren liegt die Erkenntnis zugrunde, daß die EMK schon bei verhältnismäßig kleinen Drehzahlen zuverlässig erfaßt werden kann, solange alle Wicklungen stromlos sind. Bei Stromfluß sind u. a. durch die Störungen infolge der Schaltvorgänge bei Pulsweitenmodulation höhere Drehzahlen, d. h. größere Amplituden der EMK erforderlich, um die EMK zuverlässig auswerten zu können.

[0041] In Fig. 6 sowie in der Ausschnittvergrößerung in Fig. 7 sind jeweils die Ausgangssignale  $\Pi_{EU}, \Pi_{EV}$  und  $\Pi_{EW}$  der EMK-Auswertung 8 sowie der Stromverlauf  $i$  in einer der Motorzuleitungen veranschaulicht. Der Hochlaufvorgang vom Stillstand besteht aus den Betriebsphasen I Ausrichten, II Startsequenz und III Normalbetrieb. Zum Ausrichten in der Phase I wird in alle Wicklungsstränge ein Gleichstrom eingespeist. Der Rotor richtet sich daraufhin auf eine vorgegebene Lage aus. Ausgehend von der nun bekannten, eindeutigen Rotor-Lage werden die Motorwicklungen in einer geeigneten Weise bestromt, bis eine ausreichend hohe Drehzahl erreicht ist. Anschließend erfolgt die Kommutierung nach dem oben bereits beschriebenen Prinzip. Die spezielle Anlaufsequenz II soll im Folgenden anhand der Fig. 7 genauer beschrieben werden.

[0042] Nach dem Ausrichten des Rotors, z. B. indem der Schaltzustand  $\Sigma_2$  von der Steuereinheit 6 über die Steuersignale  $\Sigma_{S1}$  bis  $\Sigma_{S6}$  ausgegeben wird (vgl. dazu Fig. 3), erfolgt zu einem Zeitpunkt  $t_1$  die Vorgabe von Zustand  $\Sigma_6$ , was eine Weiterschaltung des Statorfeldes zur Folge hat, wodurch der Rotor in die gewünschte Drehrichtung beschleunigt. Dieser Zustand wird für die Zeitdauer  $t_{\Sigma 6}$  beibehalten, bis zum Zeitpunkt  $t_2$  alle Halbleiter der Halbleiterbrücke 4 ausgeschaltet werden. Hierdurch werden die Wicklungsstränge stromlos, wodurch trotz der noch verhältnismäßig kleinen Drehzahl eine sichere Detektion der Polaritätsänderung der EMK im Strang u zum Zeitpunkt  $t_3$  möglich wird, was die steigende Flanke des Signals  $\Pi_{EU}$  signalisiert. Daraufhin wird der nachfolgende Zustand  $\Sigma_8$  für die Zeitdauer  $t_{\Sigma 8}$  aktiviert. Die nach dem Ausschalten zum Zeitpunkt  $t_4$  stromlos gewordene Wicklung erlaubt eine zuverlässige Detektion des Polaritätswechsels der EMK im Strang w, signalisiert durch die fallende Flanke von Signal  $\Pi_{EW}$  zum Zeitpunkt  $t_5$ . Diese Flanke leitet den Zustand  $\Sigma_{10}$  ein. Diese Abfolge wiederholt sich sinngemäß, bis entweder eine festgelegte Anzahl von Zuständen  $N_{\Sigma}$  ausgegeben oder eine festgelegte Drehzahl  $n_{\min}$  überschritten wurde. Ist dies der Fall, dann erfolgt der Übergang zum Normalbetrieb, d. h. die Anwendung des oben erläuterten Prinzips der 12-Schritt-Kommutierung.

[0043] In Fig. 5 ist ergänzend noch der beschriebene Ab-

lauf des Grundprinzips des Startvorgangs allgemein in Form eines Flußdiagramms dargestellt.

[0044] Die beschriebene Methode hat den entscheidenden Vorteil, daß es sich um einen geschlossenen Wirkungskreis handelt, d. h. von der ersten Beschleunigungsphase nach dem Ausrichten des Rotors an wird stets der Verlauf der EMK in den Steuerungsablauf mit einbezogen. Im Vergleich zu einer Startsequenz mit offenem Wirkungskreis, wobei zu Beginn aufgrund der ständigen Bestromung der Wicklung die Detektion der EMK nicht möglich ist, wird erfindungsgemäß ein wesentlich besseres Anlaufverhalten erreicht. Selbst dann, wenn der Motor unter einer stärkeren Last anlaufen muß, erfolgt die Kommutierung stets zum richtigen Zeitpunkt, da eine Miteinbeziehung der EMK erfolgt.

[0045] Bei den während der Startsequenz II vorgegebenen Zuständen (im Beispiel  $\Sigma_2, \Sigma_6, \Sigma_8, \Sigma_{10} \dots$ ) handelt es sich erfindungsgemäß ausschließlich um die zum Erreichen der 12-Schritt-Kommutierung eingefügten Kommutierungsschritte, bei denen alle drei Wicklungsanschlüsse mit der Gleichspannungsquelle 10 verbunden sind, d. h. stets jeweils drei Leistungshalbleiter aktiv sind. Zur Begrenzung des Wicklungsstromes werden die "oberen" (ungeradzahlig) Leistungshalbleiter der Halbleiterbrücke 4 nach Fig. 1 pulswertenmoduliert getaktet. Diese Methode hat den Vorteil, daß die Ladung der Boot-Strap-Kapazitäten erhalten bleibt, was bei Lösungen nach dem Stand der Technik nicht immer der Fall ist, da hier während des Anlaufs ein Wicklungsanschluß für eine längere Zeitdauer offen sein kann und sich der zum betreffenden Zweig der Halbleiterbrücke gehörende Boot-Strap-Kondensator entladen kann. Ein nicht weniger wichtiger Vorteil liegt darin, daß der Beginn der erfindungsgemäß während der Startsequenz II vorgegebenen Zustände mit dem Polaritätswechsel der EMK zusammenfällt, wodurch im Gegensatz zum Stand der Technik auf eine Verschiebung um  $\Phi_{\text{kom}}$  verzichtet werden kann. Während des Starts liegt keine zuverlässige Information über die Drehzahl des Motors vor, weshalb eine Berechnung der erforderlichen Verzögerungszeit  $t_{\text{kom}}$  aus  $\Phi_{\text{kom}}$  kritisch wäre.

[0046] Die Zeiten  $t_{\Sigma 6}, t_{\Sigma 8}, t_{\Sigma 10}, \dots$  nach Fig. 7 richten sich nach der kleinsten mechanischen Last und dem kleinstmöglichen Trägheitsmoment der rotierenden Teile und können auf einfache Weise aus der Bewegungsgleichung berechnet oder aber empirisch ermittelt werden.

[0047] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung dieses Verfahrens wird die Zeitdauer  $\Delta t$  (vgl. nochmals Fig. 7) nach dem Abschalten der Halbleiterschalter der Brücke 4, z. B. zum Zeitpunkt  $t_2$  bis zur Detektion der Polaritätsänderung der EMK im Wicklungsstrang u zum Zeitpunkt  $t_3$ , von der Steuereinheit 6 gemessen.  $\Delta t$  wird als Maß herangezogen, wie schnell der Motor beschleunigt, d. h. welche mechanische Zeitkonstante des Systems vorliegt. In Abhängigkeit von der gemessenen Zeit  $\Delta t_i$  nach dem Zustand  $\Sigma_i$  wird die Zeitdauer des darauffolgenden Zustandes  $t_{\Sigma i+1}$  angepaßt, und zwar so, daß eine maximale Beschleunigung erreicht wird. Bei großem  $\Delta t_i$  vergrößert sich die Zeitdauer  $t_{\Sigma i+1}$  und umgekehrt.

[0048] Eine mögliche Realisierung dieses Prinzips kann wie folgt aussehen. Zu einer festgelegten Startsequenz, bestehend aus aufeinanderfolgenden Zuständen (z. B.  $\Sigma_2, \Sigma_6, \Sigma_8, \Sigma_{10}, \dots$ ), werden für verschiedene mechanische Zeitkonstanten des Systems die zugehörigen Zeiten  $t_{\Sigma 2}, t_{\Sigma 6}, t_{\Sigma 8}, t_{\Sigma 10}, \dots$  aus der Bewegungsgleichung berechnet oder empirisch ermittelt und in der Steuereinheit 6 gespeichert. Nach jedem Schritt der Startsequenz wird über  $\Delta t$  geprüft, wie weit die vorgegebene Zeitdauer von der optimalen abweicht und damit aus den gespeicherten Zeiten die geeignete Zeitdauer für den nachfolgenden Zustand ausgewählt. Das Verfahren paßt sich an die mechanische Zeitkonstante des Sy-

stems somit in gewissen Grenzen automatisch an. Durch diese adaptive Methode wird in einem großen Bereich von verschiedenen Lastfällen und unterschiedlichen Trägheitsmomenten ein gutes Startverhalten erreicht.

[0049] Eine weitere Verbesserung dieses Prinzips stellt eine selbstlernende Methode dar, die sich während der Startsequenz auf den jeweils angeschlossenen Motor anpaßt, wenn z. B. die gleiche Elektronik mit unterschiedlichen Motoren betrieben werden soll. Voraussetzung für eine solche Methode ist jedoch, daß sich die Lastverhältnisse und Trägheitsmomente des Systems von Start zu Start nicht wesentlich ändern, wovon z. B. im Bereich der Lüftungstechnik im allgemeinen ausgegangen werden kann. Zum Start wird wiederum eine zuvor festgelegte Startsequenz wie oben bereits beschrieben vorgegeben. Während des Starts werden fortlaufend die Zeiten  $\Delta t_i$  erfaßt und die zugehörigen Zeiten  $t_{\Sigma i}$  um die Korrekturwerte  $\Delta t_{\Sigma i}$  so variiert, daß beim nächsten Hochlauf des Motors  $\Delta t_i$  gegen Null gehen würde. Die Korrekturwerte  $\Delta t_{\Sigma i}$  werden in der Steuereinheit 6 dauerhaft beispielsweise in einem EEPROM gespeichert. Mit jedem Start verbessert sich bei diesem Verfahren das Startverhalten des Motors. Nach einigen Anläufen wird schließlich der für den gegebenen Lastfall bzw. für das gegebene Trägheitsmoment optimale Anlauf erreicht und steht für zukünftige Anlaufvorgänge sofort zur Verfügung. Schleichende Veränderungen des Lastfalls bzw. Trägheitsmoments im System werden durch dieses Vorgehen vorteilhafterweise ebenfalls ausgeglichen, womit stets ein gleichbleibend optimierter Anlauf möglich wird.

[0050] Die im Vorherigen beispielhaft beschriebenen, der Erfindung zugrundeliegenden Steuerungsfunktionen sind in der Steuereinheit 6 in Form von kombinatorischer und sequentieller Logik realisiert, vorzugsweise mittels eines Mikroprozessors, Mikrocontrollers oder eines programmierbaren integrierten Logikschaltkreises.

[0051] Abschließend seien nochmals die wesentlichen Vorteile der Erfindung gegenüber dem Stand der Technik wie folgt zusammengefaßt.

[0052] Kostengünstige, sensorlose und geräuschlich vorteilhafte Methode zur Kommutierung eines dreisträngigen, permanenterregten Motors in Dreieck- oder Sternschaltung.

[0053] Aufgrund der 12-Schritt-Kommutierung liegen die Motorströme nahe an der Sinusform. Die daraus resultierenden geräuschlichen Verbesserungen sind insbesondere für Außenläufermotoren sehr bedeutend. Ein Außenläufermotor ist durch seine eingeschränkte Dynamik infolge der großen Massenträgheit des Außenläufer-Rotors besonders geeignet für die erfindungsgemäße sensorlose 12-Schritt-Kommutierung. Dies liegt vor allem daran, daß erfindungsgemäß die Berechnung der Zeit  $t_{\text{kom}}$  erforderlich ist. Diese muß aus der Zeitdauer zwischen den vorhergehenden Nulldurchgangsinformationen der EMK-Auswertung gewonnen werden. Dies ist vor allem dann mit einfachen Mitteln ausreichend genau möglich, wenn sich die Motordrehzahl nicht übermäßig schnell ändert. Dies macht den Außenläufer besonders geeignet.

[0054] Robuste Methode für den sensorlosen Start durch Nutzung der bei der 12-Schritt-Kommutierung zusätzlich eingefügten Zwischenzustände, die in Phase mit den Polaritätswechseln der EMK sind.

[0055] Messung der EMK beim Startvorgang im stromlosen Zustand der Wicklungen, was die zuverlässige EMK-Auswertung schon bei relativ kleinen Drehzahlen ermöglicht. Dadurch kann auch beim Startvorgang mit einem geschlossenen Wirkungskreis gearbeitet werden, d. h. die Informationen der EMK-Auswertung können in den Ablauf beim Start mit einbezogen werden. Dadurch wird das Startverhalten verbessert und toleranter gegenüber Änderungen

der Last und des Massenträgheitsmoments.

[0056] Adaptive Startverfahren durch Vergleich der vorgegebenen Kommutierungszeit mit der idealen Kommutierungszeit durch Detektion der EMK im stromlosen Zustand der Wicklungen und Anpassung der folgenden Kommutierungszeiten an die mechanische Zeitkonstante des Systems.

[0057] Die Erfindung ist nicht auf die dargestellten und beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt, sondern umfaßt auch alle im Sinne der Erfindung gleichwirkenden Ausführungen. Ferner ist die Erfindung bislang auch noch nicht auf die im Anspruch 1 definierte Merkmalskombination beschränkt, sondern kann auch durch jede beliebige andere Kombination von bestimmten Merkmalen aller insgesamt offenbarten Einzelmerkmalen definiert sein. Dies bedeutet, daß grundsätzlich praktisch jedes Einzelmerkmal des Anspruchs 1 weggelassen bzw. durch mindestens ein an anderer Stelle der Anmeldung offenbartes Einzelmerkmal ersetzt werden kann. Insofern ist der Anspruch 1 lediglich als ein erster Formulierungsversuch für eine Erfindung zu verstehen.

#### Patentansprüche

1. System zur elektronischen Kommutierung eines bürstenlosen Gleichstrommotors (1) mit drei elektrisch um  $120^\circ$  versetzten Wicklungssträngen (u, v, w), mit einer die Wicklungsstränge (u, v, w) zur Erzeugung eines magnetischen Statordrehfeldes ansteuernden Halbleiterbrücke (4) bestehend aus sechs Leistungshalbleitern ( $S_1$  bis  $S_6$ ), einer die Leistungshalbleiter ( $S_1$  bis  $S_6$ ) entsprechend ansteuernden Steuereinheit (6) sowie einer Einrichtung zur Erfassung der jeweiligen Drehstellung eines ein permanentmagnetisches Polrad aufweisenden Rotors, wobei die Einrichtung zur Erfassung der Rotor-Drehstellung als sensorlose Auswerteeinheit (8) zur Auswertung der am gerade nicht angesteuerten Wicklungsanschluß des Motors meßbaren, vom rotierenden Polrad induzierten Spannung ausgebildet ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (6) die Leistungshalbleiter ( $S_1$  bis  $S_6$ ) in Abhängigkeit von den Rotor-Drehstellungen über eine elektrische Umdrehung des Gleichstrommotors (1) hinweg mittels einer 12-Schritt-Kommutierung in zwölf unterschiedlichen Schaltzuständen ansteuert.
2. System nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (8) jeweils die Spannung zwischen einem Motorwicklungsanschluß (U, V, W) und einem gemeinsamen Bezugspunkt (X) erfaßt und auswertet.
3. System nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der gemeinsame Bezugspunkt (X) so festgelegt ist, daß die gemessenen Spannungen in Phase zu den von dem rotierenden Polrad in den in Stern geschalteten Wicklungssträngen induzierten Spannungen verläuft, oder in Phase zu den sich bei einer Transformation einer Dreieckschaltung in eine äquivalente Sternschaltung ergebenden fiktiven Strangspannungen.
4. System nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Bezugspunkt (X) von einem realen Wicklungssternpunkt des Motors direkt abgeleitet wird.
5. System nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Bezugspunkt (X) eine externe Nachbildung eines Wicklungssternpunktes des Motors ist.
6. System nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (8) derart ausgelegt ist, daß sie die jeweiligen induzierten Polradspannungen ( $E_U$ ,  $E_V$ ,  $E_W$ ) bezüglich ihrer Polaritäten,



insbesondere ihrer Nulldurchgänge, erfaßt und in Abhängigkeit davon binäre Ausgangssignale ( $\Pi_{EU}$ ,  $\Pi_{EV}$ ,  $\Pi_{EW}$ ) als Steuer-Eingangssignale für die Steuereinheit (6) erzeugt.

7. System nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuereinheit (6) zur Drehzahl-einstellung des Motors (1) in Abhängigkeit von einem über einen Steuereingang (6a) zugeführten Drehzahlstell-signal ( $S_D$ ) jeweils einen der Leistungshalbleiter ( $S_1$  bis  $S_6$ ) pulswertenmoduliert getaktet ansteuert.

8. System nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass in jedem Umdrehungszustand maximal nur einer der Leistungshalbleiter ( $S_1$  bis  $S_6$ ) pulswertenmoduliert getaktet wird, und zwar insbesondere jeweils über einen zusammenhängenden elektrischen Winkel von  $60^\circ$ .

9. System nach einem der Ansprüche 1 bis 8, gekennzeichnet durch eine sich drehzahlabhängig ändernde Kommutierung, wobei vorzugsweise die Kommutierung zumindest in einer Teilmenge der zwölf Kommutierungsschritte, insbesondere bei jedem zweiten Kommutierungsschritt, mit zunehmender Drehzahl jeweils früher erfolgt.

10. System nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass sich über die elektrische Umdrehung hinweg jeweils einerseits ungeradzahlige Zustände ( $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_3$  ...  $\Sigma_{11}$ ), in denen zwei Wicklungsanschlüsse bestromt und ein Wicklungsanschluß offen ist, und andererseits geradzahlige Zustände ( $\Sigma_2$ ,  $\Sigma_4$  ...  $\Sigma_{12}$ ), in denen alle Wicklungsanschlüsse (U, V und W) bestromt sind, abwechseln, wobei zur Kommutierung die zeitliche Länge ( $t_{kom}$ ) der geradzahligen Zustände rechnerisch aus der jeweiligen Drehzahl und einem vorgegebenen Kommutierungswinkel ( $\Phi_{kom}$ ) ermittelt wird.

11. System nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass zur drehzahlabhängigen Kommutierung der vorgesehene Kommutierungswinkel ( $\Phi_{kom}$ ) vorzugsweise degressiv mit der Drehzahl verändert, insbesondere mit steigender Drehzahl verkleinert wird.

12. System nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass zum Start des Motors (1) aus dem Stillstand zunächst der Rotor durch eine konstante Gleichstrom-Bestromung der Wicklungsstränge (u, v, w) in eine definierte Drehstellung ausgerichtet wird.

13. System nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass auch während des Anlaufs des Motors (1) die Kommutierung anhand der von der EMK-Auswertung (8) erfaßten Rotordrehstellungen erfolgt.

14. System nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass während der Anlaufphase (II) des Motors (1) von der Steuereinheit (6) zur besseren Erfassung der – bedingt durch die noch relativ geringe Drehzahl noch schwachen – EMK zeitweise alle Wicklungsstränge (u, v, w) stromlos geschaltet werden.

15. System nach einem der Ansprüche 1 bis 14, gekennzeichnet durch eine adaptive Anlauf-Kommutierungssteuerung, wobei die Kommutierungszeitpunkte selbsttätig in Abhängigkeit von dem Laufverhalten bzw. der mechanischen Zeitkonstante des Antriebssystems, insbesondere vom Lastmoment und/oder Trägheitsmoment der rotierenden Teile, angepaßt werden.

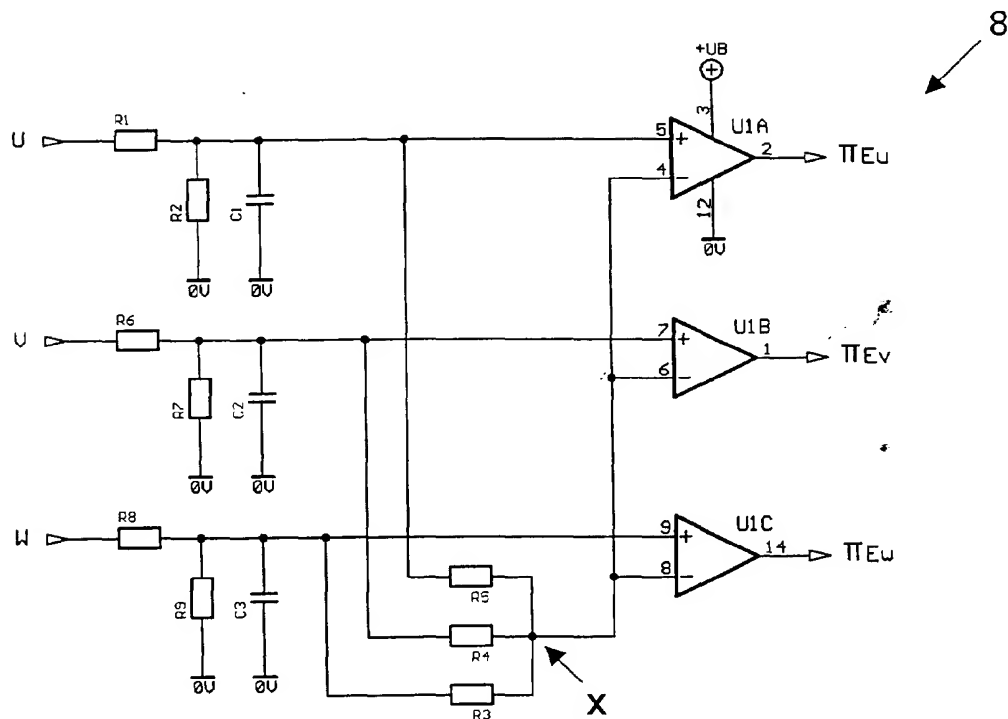
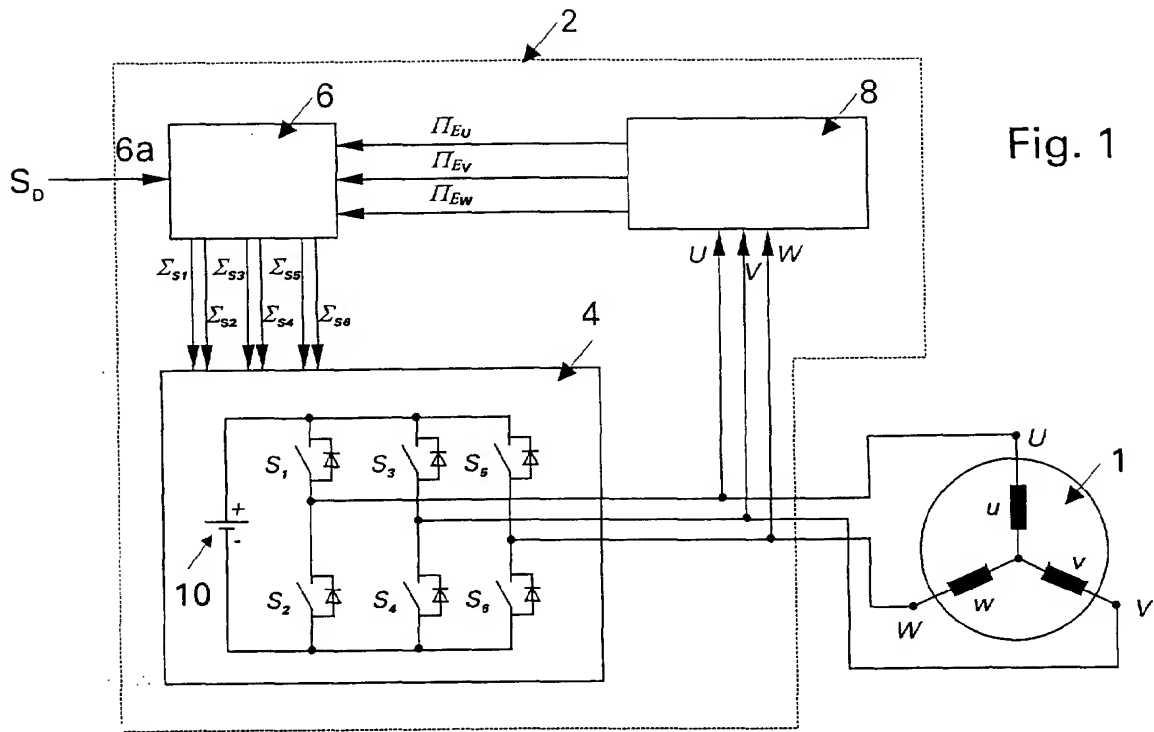
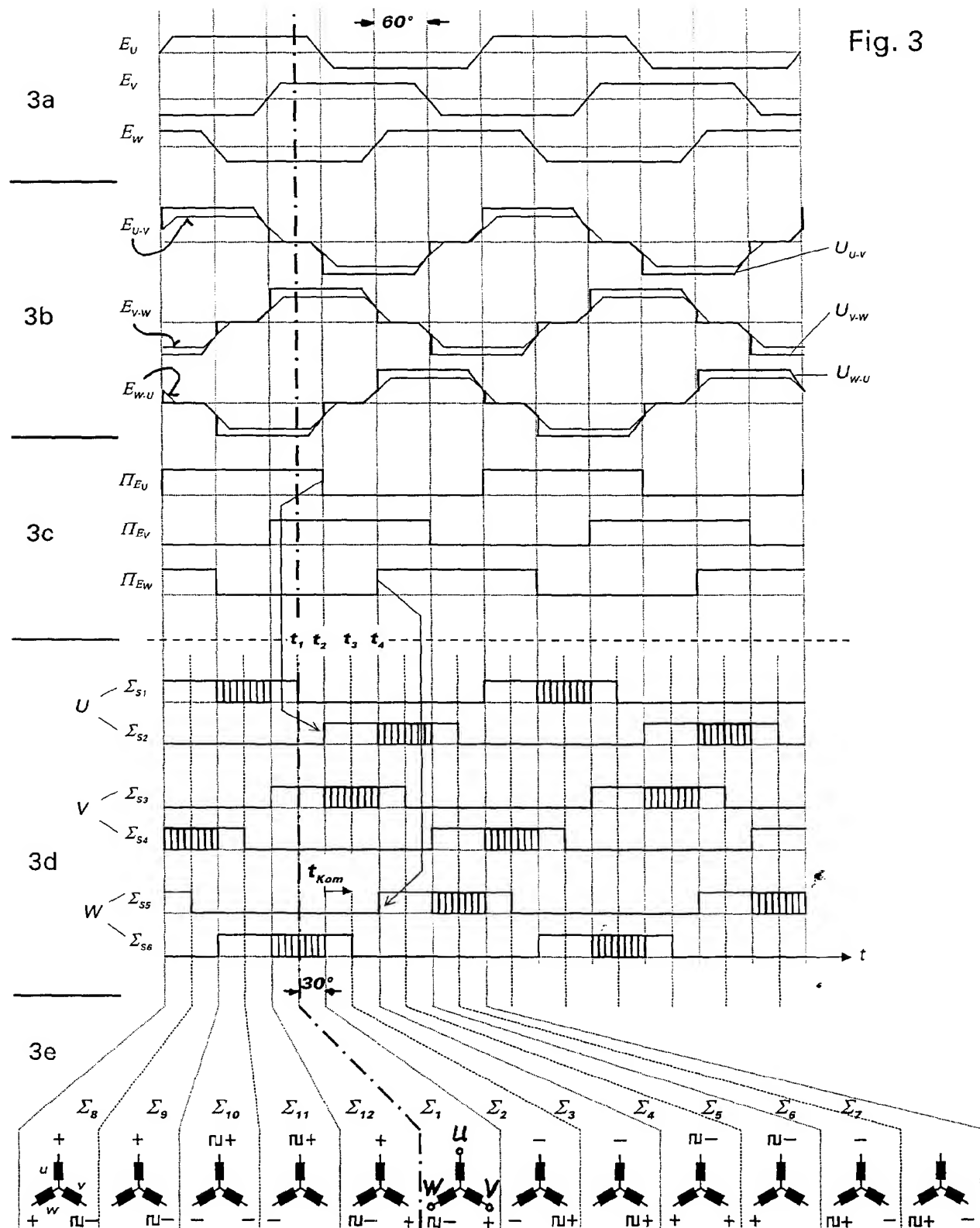




Fig. 3



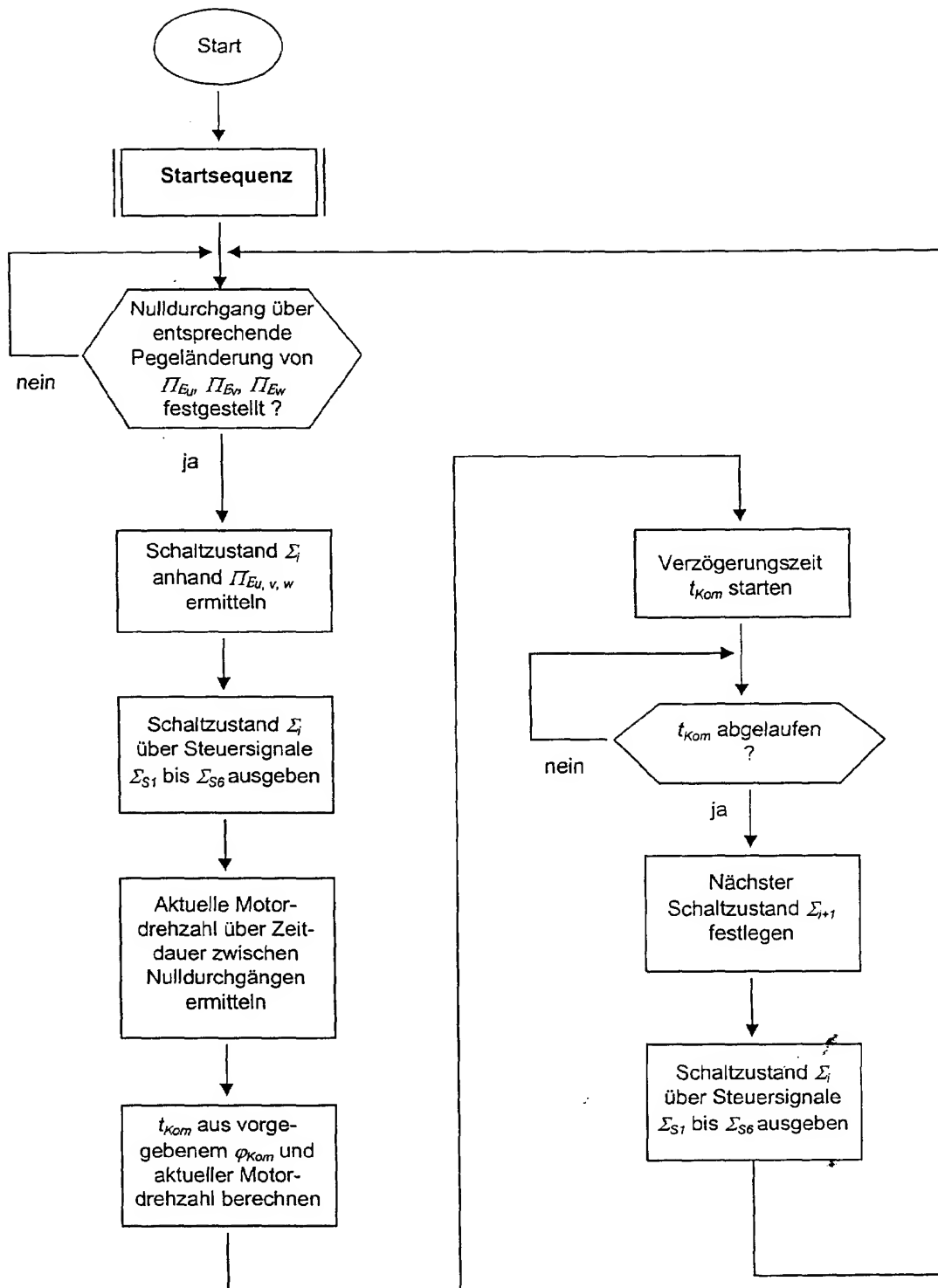


Fig. 4

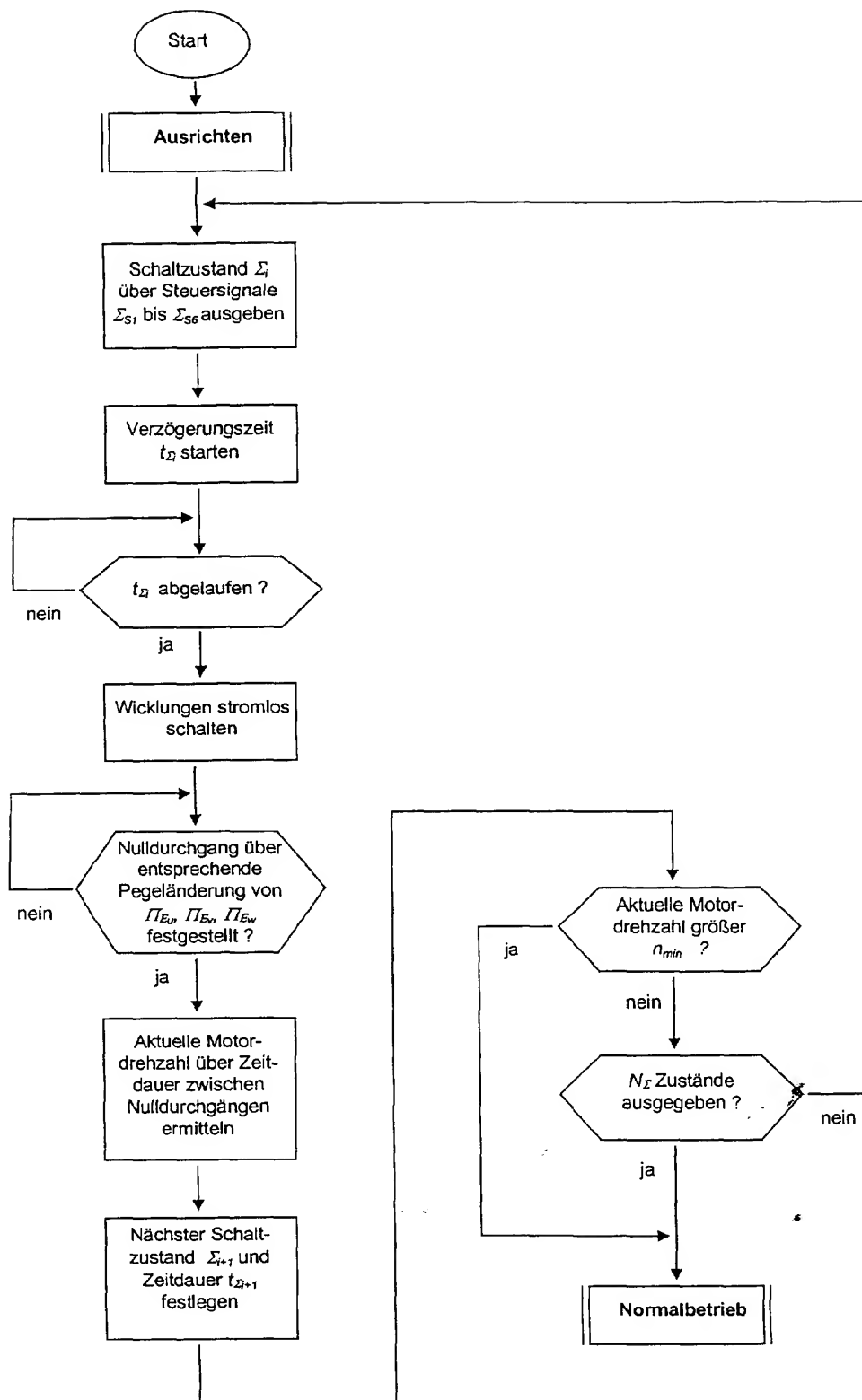


Fig. 5

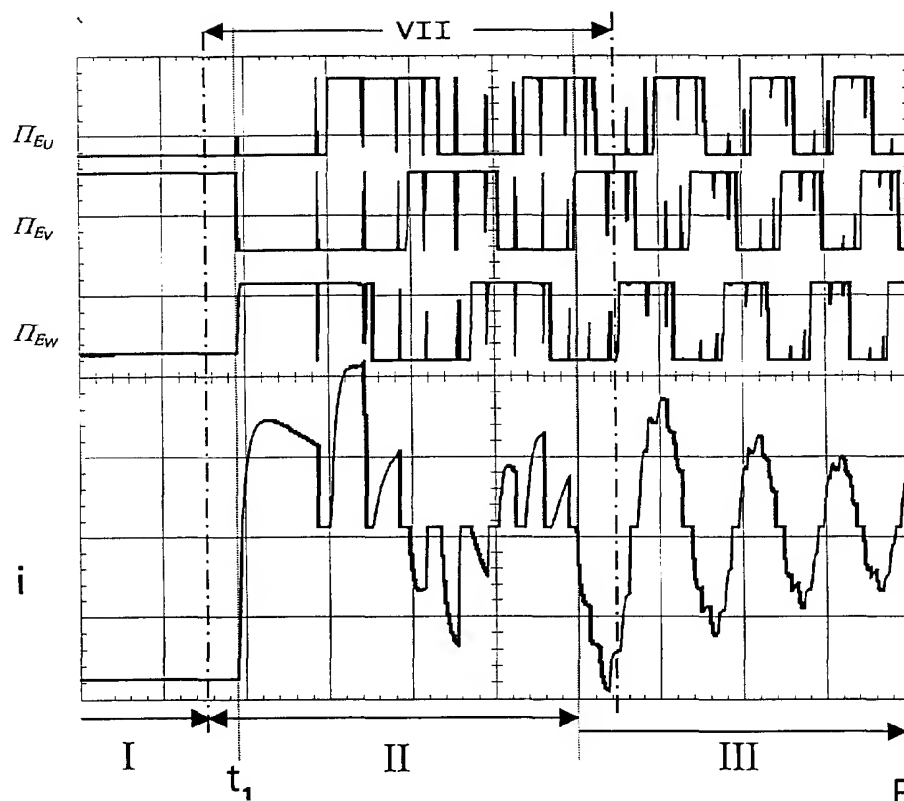


Fig. 6

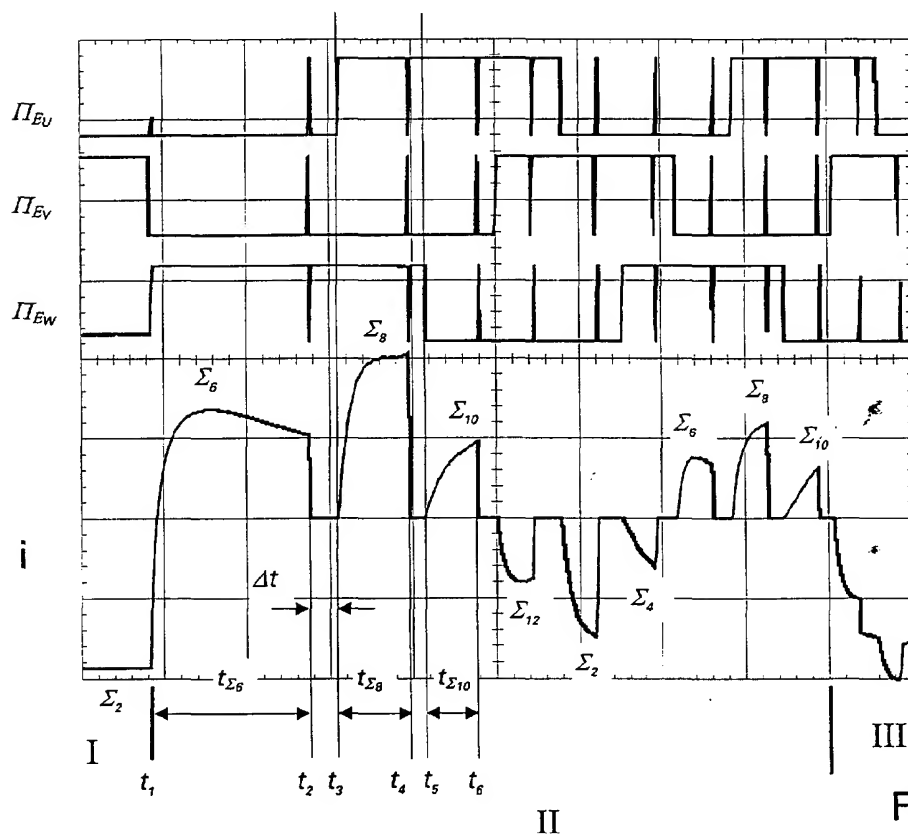


Fig. 7